

Продолжение. Начало в №1'2012

Диоды и тиристоры — это очень просто!

Часть 4. Структура и принцип работы

Знание принципов работы полупроводниковых приборов необходимо специалистам, занимающимся проектированием преобразовательной техники. Мы продолжаем рассмотрение базовых вопросов, связанных со структурой диодов и тиристоров и их электрическими характеристиками.

Арендт Винтрич (Arendt Wintrich)

Ульрих Николаи (Ulrich Nicolai)

Вернер Турски (Werner Tursky)

Тобиас Райманн (Tobias Reimann)

Перевод и комментарии: Андрей Колпаков

Andrey.Kolpakov@semikron.com

Общие положения

Выпускаемые в настоящее время полупроводниковые диоды производятся из монокристаллического кремния, их вольт-амперная характеристика имеет асимметричный характер (рис. 1). Следует отличать выпрямители, свойства проводимости которых обеспечиваются за счет переноса подвижных зарядов, от полупроводников с *n*- или *p*-легированной зоной (*p-n*-диоды) и диодов Шоттки, в которых эф-

фект проводимости обусловлен наличием перехода «металл–полупроводник».

p-n-диоды состоят из высоколегированного *p*⁺-слоя с большим количеством свободных дырок, высоколегированного *n*⁺-слоя с большим количеством свободных электронов и слаболегированной *n*-области (называемой также промежуточным *i*-слоем) между ними (рис. 2). Блокирующая способность такого элемента определяется шириной базы *w_p* и степенью легирования. Электроны и дырки, находящиеся вблизи *p-n*-перехода, рекомбинируют друг с другом и не могут использоваться для передачи тока, так создается тонкий изолирующий слой, в котором отсутствуют свободные носители. Он называется зоной пространственного заряда, поскольку разность потенциалов между *p*- и *n*-примесным кремнием образуется в результате заряда неподвижных ионизированных атомов. Данный процесс происходит без приложения внешнего напряжения.

Если отрицательный сигнал приложен к *p*-слою кремния, а положительный — к *n*-слою, свободные электроны в *n*-области движутся по направлению к катоду, а дырки в *p*-области — к аноду. Благодаря этому изолирующая зона пространственного заряда расширяется, и напряженность электрического поля вблизи *p-n*-перехода возрастает. При этом диод

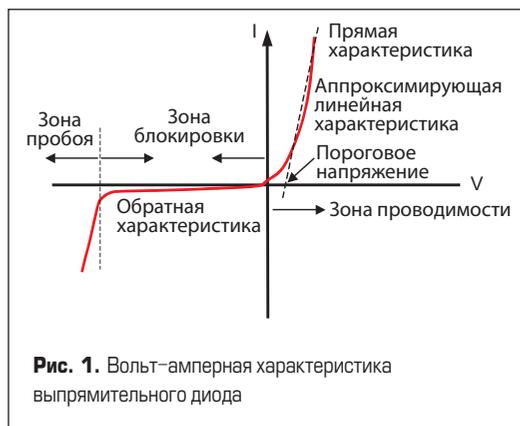


Рис. 1. Вольт-амперная характеристика выпрямительного диода

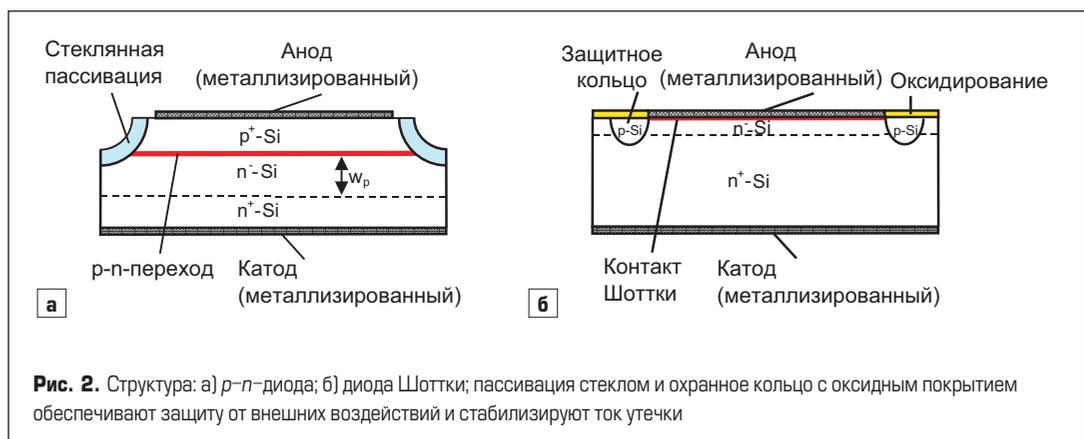


Рис. 2. Структура: а) *p-n*-диода; б) диода Шоттки; пассивация стеклом и охранный кольцо с оксидным покрытием обеспечивают защиту от внешних воздействий и стабилизируют ток утечки

смещен в обратном направлении, и он проводит незначительный ток утечки. Причиной возникновения обратного тока являются свободные носители, генерируемые в области пространственного заряда за счет тепловой энергии или иррадиации и движущиеся по направлению к терминалам.

Если к *p*-слою приложено положительное напряжение, а к *n*-слою — отрицательное, то свободные электроны в *n*-зоне и дырки в *p*-зоне выбрасываются в область пространственного заряда. В результате эта зона заполняется подвижными носителями заряда и исчезает, а протекание тока приводит к дальнейшему поступлению носителей из внешней цепи (прямая характеристика на рис. 1).

В диодах Шоттки зона контакта металл-полупроводник (контакт Шоттки) выполняет функцию *p-n*-перехода. Принципиальное различие между ними и *p-n*-диодами состоит в том, что у последних электроны и дырки участвуют в процессе проводимости (*p-n*-диоды являются биполярными компонентами). В униполярном переходе Шоттки за передачу тока отвечает только один тип носителей заряда, что оказывает сильное влияние на динамические характеристики.

Статические характеристики

Состояние проводимости

После того как приложенное к диоду прямое напряжение превысит пороговый уровень (примерно 0,7 В для кремния), начинается быстрое нарастание тока I_F . Вид прямой характеристики, показанной на рис. 1, начинает искажаться только на уровнях тока, намного превышающих допустимое значение. Температурный коэффициент напряжения насыщения (ТКН) у кремниевых структур отрицательный, т. е. с ростом температуры включение диодов происходит при меньших уровнях. При очень больших токах полярность ТКН становится положительной. С увеличением нагрузки растут потери проводимости диода (произведение прямого тока на прямое напряжение), что приводит к его нагреву. Максимально допустимая температура кристалла ограничивает предельное значение I_F в конкретных условиях эксплуатации.

Блокирующая способность

Приложение к диоду обратного напряжения V_R приводит к появлению тока утечки, который

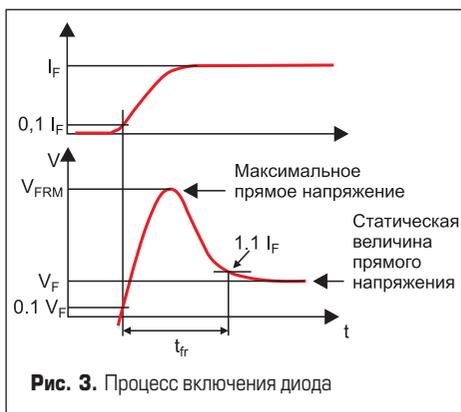


Рис. 3. Процесс включения диода

вначале быстро растет (при увеличении V_R до нескольких вольт), после чего меняется незначительно. Утечка увеличивается пропорционально температуре, особенно ярко эта зависимость выражена у диодов Шоттки, однако соответствующие потери в общем балансе являются незначительными.

При превышении обратным напряжением порогового значения обратный ток начинает резко возрастать, что обусловлено двумя механизмами — эффектом Зенера и лавинным пробоем. У диодов с высоколегированной *n* средней зоной напряженность поля в области пространственного заряда может стать настолько высокой, что электроны будут терять связь с атомами кремния, создавая свободные пары носителей заряда. Такая ситуация, сопровождающаяся резким ростом тока утечки, называется эффектом Зенера. Напряжение туннельного пробоя *p-n*-перехода (или напряжение Зенера) падает с увеличением температуры.

Эффект увеличения напряженности поля наблюдается только у диодов с относительно низким напряжением пробоя (5,7 В). При более высоких уровнях сигнала пробой вызывается лавинным эффектом, причем лавинные диоды зачастую ошибочно называют стабилитронами (или диодами Зенера). Свободные носители в области пространственного заряда генерируются в результате воздействия тепловой или оптической энергии. При лавинном пробое электрическое поле, превращающееся в области пространственного заряда, ускоряет эти носители и увеличивает их кинетическую энергию до такой степени, что они создают большое количество пар путем соударения валентных электронов. Данный процесс также называется ионизацией за счет столкновения. Количество свободных носителей заряда растет лавинообразно, так же увеличивается и обратный ток. Напряжение лавинного пробоя имеет положительный температурный коэффициент, т. е. оно растет пропорционально нагреву. Работа в режиме лавинного пробоя допустима только для специально спроектированных полупроводниковых элементов.

Динамические характеристики

Включение

При открывании диода его прямое напряжение вначале возрастает до максимума V_{RRM}

и только после того как *n*-область наполнится носителями заряда, оно снижается до установившегося значения V_F (рис. 3). Время включения (прямого восстановления) t_{tr} составляет примерно 100 нс. Чем быстрее нарастает ток и чем шире низколегированная зона *n* диода, тем выше величина V_{RRM} , которая может достигать 300 В.

Выключение *p-n*-диодов

В проводящем состоянии практически весь объем полупроводника заполнен электронами и дырками; если полярность напряжения меняется, диод начинает проводить в обратном направлении. При протекании обратного тока происходит рекомбинация носителей, в результате чего избыточный заряд истощается. Когда его величина в зоне *p-n*-перехода приблизится к нулю, блокирующая способность диода восстанавливается, ток обратного восстановления начинает спадать с пикового уровня I_{RRM} (рис. 4).

Площадь треугольника, отмеченного на рис. 4 красным цветом, соответствует заряду обратного восстановления Q_{rr} , запасенному в области полупроводникового перехода. Когда ток восстановления проходит свое пиковое значение I_{RRM} он начинает спадать; одновременно начинается процесс нарастания напряжения. Интеграл от их произведения представляет собой энергию потерь выключения, которые при работе на высокой частоте вносят заметный вклад в общее значение мощности рассеяния и даже могут стать доминирующими. Время t_{rr} , заряд Q_{rr} и ток I_{RRM} обратного восстановления растут при увеличении температуры. Диоды, у которых эти показатели сведены к минимуму, например за счет снижения времени жизни носителей, называются быстрыми.

Диоды Шоттки являются униполярными компонентами, поскольку для передачи тока они используют только один тип носителей. В состоянии прямой проводимости у них не происходит накопления заряда, поэтому при изменении полярности напряжения не возникает тока обратного восстановления. При запираании у диодов Шоттки практически мгновенно восстанавливается блокирующая способность, а причиной незначительного обратного тока является разряд емкости перехода. Время обратного восстановления для компонентов данного типа не нормируется.

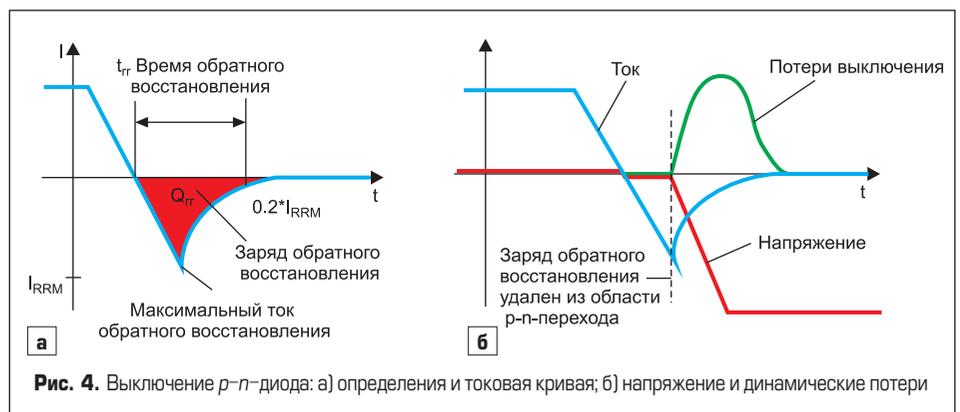
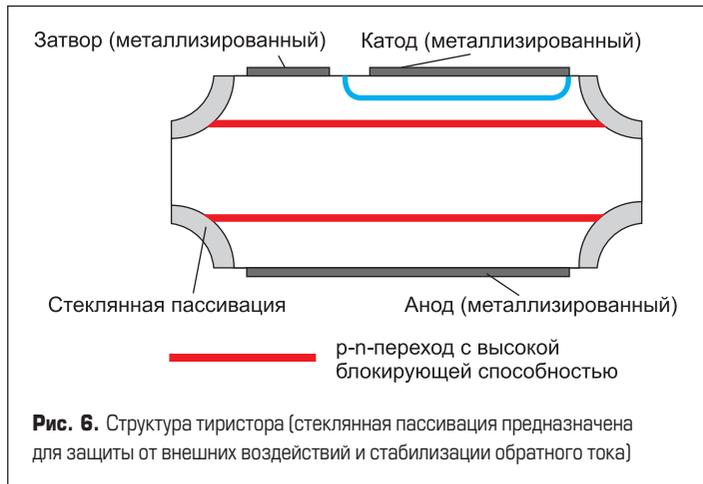
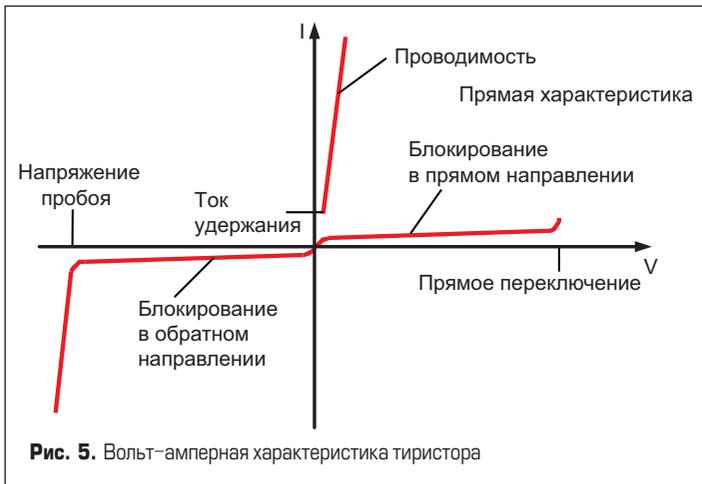


Рис. 4. Выключение *p-n*-диода: а) определения и токовая кривая; б) напряжение и динамические потери



Благодаря низкой величине динамических потерь диоды Шоттки используются прежде всего в высокочастотных схемах. Их недостатком является невысокая блокирующая способность, являющаяся следствием резкого возрастания обратного тока при нагреве и униполярной прямой характеристики. Обратное напряжение доступных на рынке кремниевых диодов не превышает 200 В, у элементов из арсенида галлия (GaAs) эта величина составляет 300 В. Наиболее перспективными являются карбидокремниевые (SiC) диоды Шоттки, рабочее напряжение которых достигает 1200 и даже 1700 В. Пригодность полупроводникового материала для изготовления высоковольтных диодов Шоттки определяется напряженностью поля пробоя, которая у SiC в девять раз выше, чем у кремния.

Тиристор — структура и принцип работы

Тиристор отличается от прочих полупроводниковых приборов наличием не менее трех *p-n*-переходов, которые могут переключаться из проводящего состояния в непроводящее (рис. 5). Зачастую термином «тиристор» называют «обратно-блокируемый» триод, который может выключаться, но не может включаться в обратном направлении. Кроме двух силовых терминалов (анод и катод), этот силовой ключ имеет вывод управления — затвор.

Тиристор состоит из четырех *n*-легированных и *p*-легированных областей (рис. 6). Вместе с соседним *p*-слоем центральная *n*-зона образует высоковольтные *p-n*-переходы в прямом и обратном направлении, стеклянная пассивация может быть выполнена на обоих переходах. Чтобы лучше понять принцип работы тиристора, его можно условно разделить на два транзистора *n-p-n*- и *p-n-p*-типа, как показано на рис. 7.

Если катод имеет отрицательный потенциал относительно анода, ток течет от затвора к катоду, который (будучи эмиттером *n-p-n*-транзистора) начинает инжектировать электроны. Ток затвора усиливается *n-p-n*-транзистором, часть электронов достигает слаболегированной области, которая одновременно работает как коллектор *n-p-n*- и база *p-n-p*-транзистора. В *p-n-p*-части этот ток еще больше усиливается и поступает в базу *n-p-n*-

Транзистор имеет нелинейную характеристику коэффициента передачи: когда ток затвора становится таким, что в области базы выполняется соотношение $\alpha_{npn} + \alpha_{pnp} \geq 1$, усиление резко возрастает, тиристор защелкивается и переходит в проводящее состояние. Для его опрокидывания достаточно короткого импульса управления (около 10 мкс), и если ток силовой цепи превышает порог защелкивания I_L в конце этого импульса, ключ будет оставаться открытым. Если же он падает ниже тока удержания I_H , тиристор размыкается, и его блокирующая способность восстанавливается. Каждый импульс, проходящий от затвора через *p-n*-переход к катоду, может привести к срабатыванию, если он достаточно мощный. Возможные ситуации:

- наведенный на затвор импульс помехи;
- ток включения, возникающий при превышении прямого блокирующего напряжения (напряжения переключения);
- ток, генерируемый в области пространственного заряда за счет светового облучения;
- ток включения, образующийся вследствие перегрева;
- емкостный ток смещения, вызванный резким нарастанием напряжения на аноде (dv/dt).

Статические характеристики

Состояние проводимости

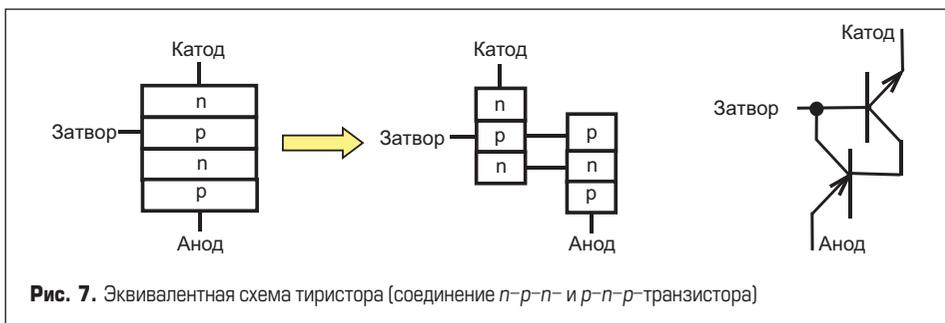
Тиристоры в открытом состоянии ведут себя примерно так же, как и диоды. После того как приложенное прямое напряжение превысит пороговый уровень, начинается быстрое нарастание тока (рис. 5). Вид пря-

мой характеристики начинает искажаться на уровнях тока, намного превышающих допустимое значение. ТКН у тиристоров отрицательный, его знак меняется на противоположный только при очень больших токах. С увеличением нагрузки растут потери проводимости диода (произведение прямого тока на прямое напряжение), что приводит к его нагреву. Максимально допустимая температура кристалла ограничивает предельный ток тиристора в конкретных условиях эксплуатации.

Заблокированное состояние

Приложение обратного напряжения V_R приводит к появлению тока утечки, который вначале быстро растет, после чего меняется незначительно. Обратный ток увеличивается пропорционально температуре, а при превышении обратным напряжением порогового значения он резко возрастает вследствие лавинного пробоя (рис. 5).

Если напряжение приложено к тиристоры в прямом направлении, то в начале процесса он ведет себя так же, как и в предыдущем случае. После достижения порогового уровня переключения тиристор резко переходит в проводящее состояние, которое сохраняется до тех пор, пока ток не упадет ниже порога защелкивания I_L . Величина прямого напряжения в выключенном состоянии также является термозависимой, причем температурный коэффициент имеет очень большой разброс. При высоких температурах прямой ток утечки, как правило, намного выше, чем обратный. Причиной этого является высокий коэффициент передачи *n-p-n*-транзистора, для которого этот ток является базовым. Однако это ни в коей



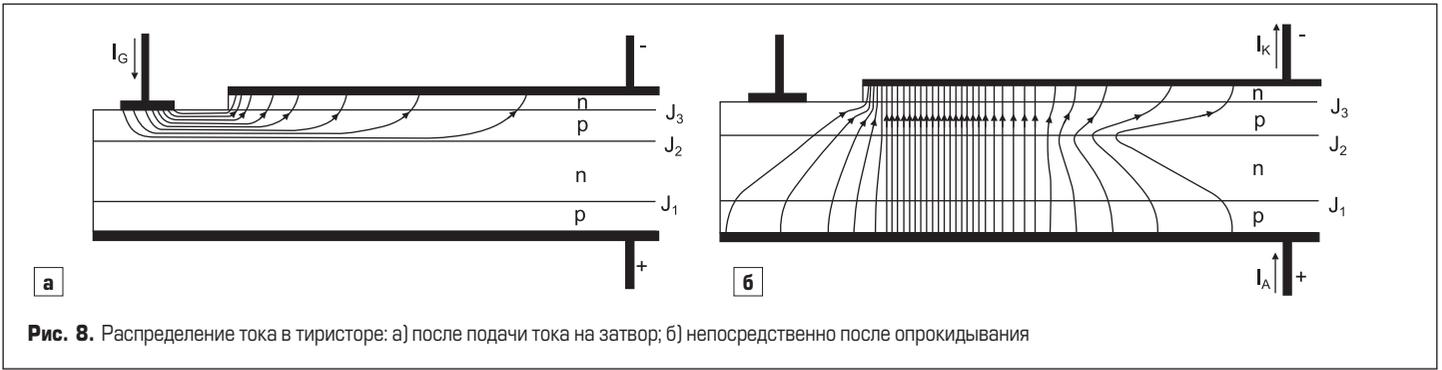


Рис. 8. Распределение тока в тиристоре: а) после подачи тока на затвор; б) непосредственно после опрокидывания

мере не ограничивает «применяемость» тиристоров и не уменьшает их надежность. При нормальных условиях эксплуатации потери за счет токов утечки пренебрежимо малы и могут не учитываться в общем балансе.

Динамические характеристики

Включение подачи тока управления на затвор

Опрокидывание тиристора начинается в зоне, где плотность тока управления максимальна. Расширение этой области идет относительно медленно (в зависимости от условий работы скорость распространения составляет 30–100 мкм/с), то есть для тиристора диаметром 100 мм переход в полностью проводящее состояние занимает примерно 100 мс (рис. 8).

После включения тиристора прямое напряжение медленно спадает до статического значения V_F , что приводит к образованию потерь мощности, увеличивающихся пропорционально скорости нарастания тока (рис. 9).

Поскольку зона проводимости в начале процесса открывания очень мала, статические потери, вызванные постепенным спадом напряжения до установившегося значения V_F , концентрируются в достаточно узкой области. Это приводит к резкому локальному нагреву соответствующей зоны кристалла. Чтобы исключить повреждение тиристора, необходимо ограничить скорость его включения; соответ-

ствующая величина, называемая критической скоростью нарастания тока $(di/dt)_{cr}$, приводится в спецификациях.

В мощных ключах критическая величина $(di/dt)_{cr}$ может быть увеличена с помощью дополнительной полупроводниковой структуры, называемой «пилотным тиристором», катод которого подключается к затвору

основного элемента (рис. 10). Он выполняет функцию усиления тока управления, причем энергия управления поступает из силовой цепи. В документации подобные ключи называются «тиристоры с усиливающим затвором» (amplifying gate-thyristor).

Стойкость к di/dt может быть повышена за счет применения так называемого «пальцевидного» усиливающего затвора, при этом «пилотный» тиристор располагается в центре кристалла (рис. 10). Недостатком такого решения является сокращение активной площади эмиттера, что приводит к снижению токонесящей способности ключа.

Включение за счет емкостного тока смещения (dv/dt-запуск)

Каждый p-n-переход имеет емкость, величина которой зависит от приложенного сигнала. Она достигает наибольшего значения при отсутствии напряжения и снижается до минимума при его повышении до предельных уровней. Изменения напряжения при высоком значении dv/dt создают емкостный ток смещения, протекающий через p-n-переход. Если он достигает определенного значения, тиристор может опрокинуться (как и от любого тока, проходящего по цепи p-база-эмиттер).

Включение за счет превышения напряжения переключения

Когда прямое напряжение тиристора превышает определенный уровень, называемый

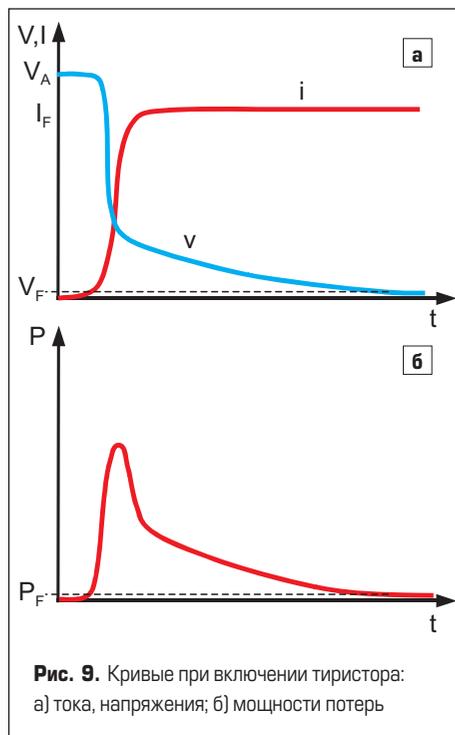


Рис. 9. Кривые при включении тиристора: а) тока, напряжения; б) мощности потерь

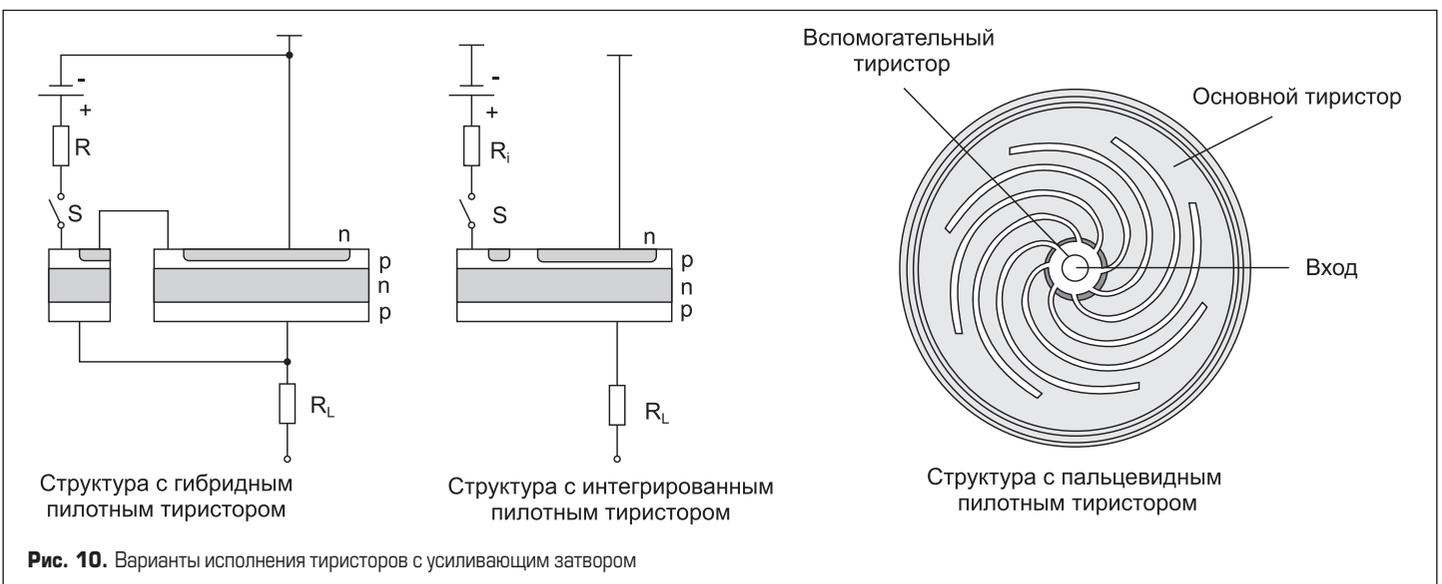


Рис. 10. Варианты исполнения тиристоров с усиливающим затвором

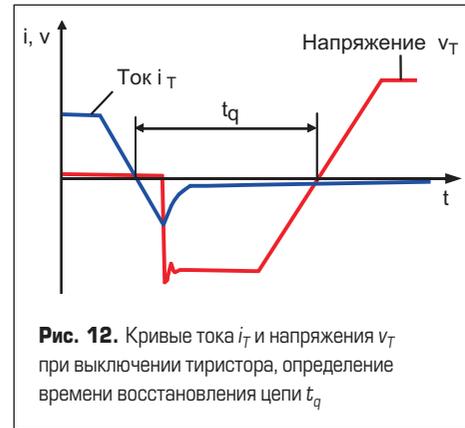
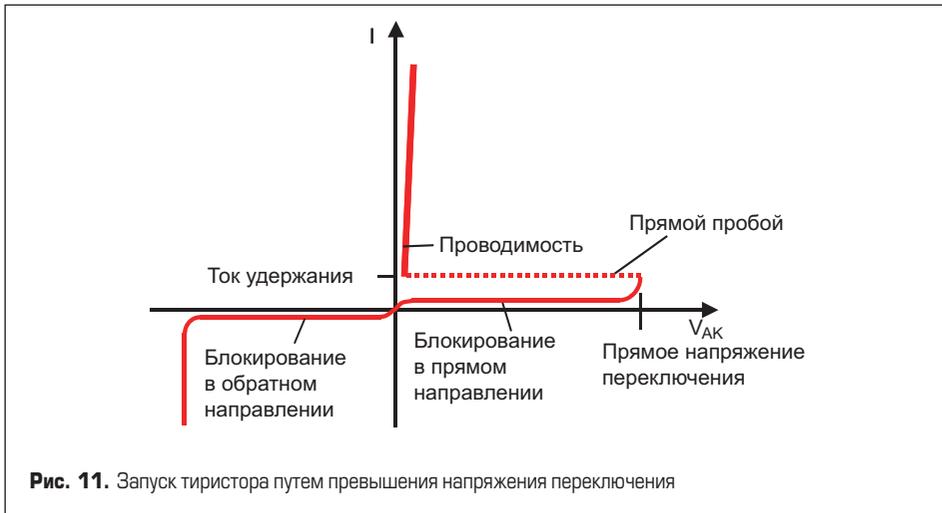


Рис. 12. Кривые тока i_T и напряжения v_T при выключении тиристора, определение времени восстановления цепи t_q

напряжением переключения (рис. 11), обратный ток возрастает настолько, что он способен опрокинуть тиристор. Поскольку ток утечки растет пропорционально температуре, а пусковой ток, соответственно, снижается, порог переключения имеет отрицательный ТКН.

Включение за счет воздействия света или температуры

Воздействие света на кристалл кремния приводит к образованию отдельных пар носителей в области пространственного заряда и возникновению тока через $p-n$ -переход к катоду. Пары носителей также образуются и при нагреве кристалла.

В состоянии проводимости весь объем кристалла тиристора (как и у выпрямительных диодов) заполнен носителями заряда. Для восстановления блокирующей способности в обратном направлении большая часть их должна быть удалена при изменении полярности напряжения. Наличие остаточного заряда в полупроводнике может привести к опрокидыванию тиристора при подаче напряжения в прямом направлении.

Время восстановления коммутируемой цепи t_q (рис. 12) представляет собой промежуток от момента перехода тока через нулевое значение до момента, когда блокирующее напряжение может быть снова приложено без опрокидывания тиристора. Типовое значение t_q находится в диапазоне 100–500 мкс, у быстрых тиристорov (с уменьшенным временем жизни носителей) оно составляет 10–100 мкс.

Антипараллельные (FWD) и снабберные диоды

Во многих применениях требуются диоды с гораздо лучшими частотными свойствами, чем у обычных выпрямителей. Например, в современных инверторах на основе IGBT/MOSFET, работающих на индуктивную нагрузку, каждый активный ключ имеет оппозитный диод, замыкающий ток нагрузки при отключении транзистора. Накопленный полупроводником заряд должен быть быстро удален, не образуя всплесков напряжения, паразитных осцилляций и дополнительных токовых перегрузок. Создаваемые для этой цели быстрые выпрямители также

называются диодами с мягкой характеристикой восстановления (soft-recovery diodes). При разработке таких элементов приходится находить оптимальный компромисс между статическими и динамическими характеристиками. Наилучшими частотными характеристиками отличаются выпрямители с барьером Шоттки, а также $p-i-n$ -диоды эпитаксиального или диффузионного типа (рис. 13).

В диодах Шоттки переход металл-полупроводник используется как блокирующий. В открытом состоянии потенциальный барьер между металлом и полупроводником составляет всего около 0,3 В (для кремния). У перехода Шоттки отсутствует диффузионное напряжение (у $p-i-n$ -диодов оно порядка 0,7 В), в результате чего величина V_F у них ниже, чем у любого другого типа выпрямителей. В n -легированном униполярном материале проводимость обеспечивается только за счет электронов. Если диод работает при напряжении, близком к предельному, ток утечки резко возрастает, что необходимо учитывать при расчете мощности потерь и перегрева чипов.

При переходе ключа из проводящего состояния в непроводящее в идеальном случае заряжается только небольшая емкость зоны пространственного заряда. Благодаря этому величина накопленного заряда униполярных

выпрямителей примерно в 10 раз меньше, чем у $p-i-n$ -диодов, соответственно, намного ниже получаются и потери переключения. Отличные частотные свойства и низкие потери проводимости позволяют диодам Шоттки находить применение в низковольтных высокочастотных схемах и снабберных цепях.

Основным ограничением для применения выпрямителей с барьером Шоттки является низкая блокирующая способность (как правило, не более 100 В). Для работы на более высоких напряжениях необходимо расширять n -зону, что неизбежно ведет к увеличению прямого напряжения. В этом случае применяются материалы с более высокой допустимой напряженностью поля, такие как арсенид галлия GaAs (≤ 600 В) или карбид кремния SiC (≤ 1700 В). Они имеют характеристики проводимости, аналогичные $p-i-n$ -диодам, однако динамические свойства этих полупроводников намного лучше. До настоящего времени основным барьером для массового распространения является высокая стоимость данных материалов, однако их частотные и тепловые характеристики в некоторых применениях оказываются приоритетными.

У производимых в настоящее время выпрямителей средний слой имеет n -тип, и он легирован в гораздо меньшей степени, чем крайние области. В эпитаксиальных $p-i-n$ -диодах (рис. 13) n -зона сперва отделяется от высоколегированной n^+ -подложки, а затем диффузионным способом

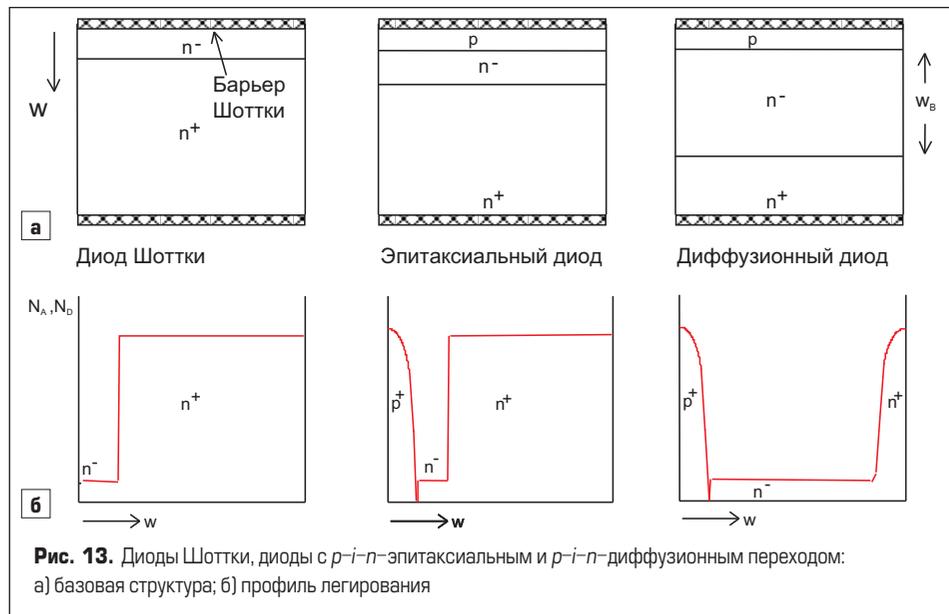


Рис. 13. Диоды Шоттки, диоды с $p-i-n$ -эпитаксиальным и $p-i-n$ -диффузионным переходом: а) базовая структура; б) профиль легирования

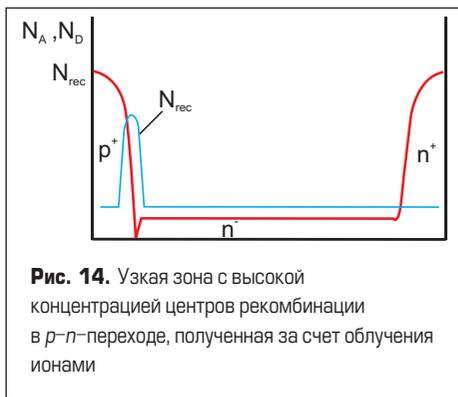


Рис. 14. Узкая зона с высокой концентрацией центров рекомбинации в *p-n*-переходе, полученная за счет облучения ионами

образуется *p*-слой. Таким образом удастся сформировать базу с очень маленькой шириной w_B (порядка нескольких мкм). Ультрабыстрые характеристики достигаются путем создания центров рекомбинации, как правило, для этого используется золото. Несмотря на их наличие, прямое напряжение V_F таких компонентов получается достаточно малым (0,6–0,8 В) благодаря узкому базовому слою w_B , однако оно все равно больше, чем у традиционного *p-n*-перехода. Как правило, эпитаксиальные диоды применяются в диапазоне напряжений 100–600 В.

Диоды с управляемым временем жизни носителей (CAL-диоды)

Для работы при напряжениях свыше 1000 В область *n* должна быть расширена еще больше, получаемый при этом переход носит название *p-i-n*-диффузионный (рис. 13). Слои *p* и *n+* у него образуются методом диффузии *n*-пластины. При этом также используются центры рекомбинации (профиль рис. 14), генерируемые за счет имплантации в кремний протонов He^{**} , которая достигается при ускорении частиц до 10 МэВ.

Распределение плотности центров рекомбинации показано на рис. 15. Выявлено, что чем ближе они расположены в *p-n*-переходе, тем лучше соотношение между пиковым значением тока обратного восстановления и прямым напряжением. В состоянии проводимости распределение носителей заряда «инвертируется», при этом наивысшая плотность носителей заряда наблюдается в *n-n+*-переходе. Как видно на рис. 15, пик индуцированных ионизирую-

щим излучением центров рекомбинации находится в *p*-области вблизи *p-n*-перехода CAL-диода, что обеспечивает низкий ток утечки. Имплантация He^{**} в сочетании с контролем времени жизни носителей заряда осуществляется путем облучения пучком электронов.

Высота пика плотности центров рекомбинации может изменяться за счет регулирования дозы He^{**} имплантации: чем выше пик, тем меньше амплитуда тока обратного восстановления. Львиная доля запасенного в CAL-диоде заряда приходится на остаточный «хвостовой» ток, величина которого контролируется уровнем базовой плотности центров рекомбинации (рис. 15). Уменьшение времени жизни основных носителей снижает длительность «хвоста», однако одновременно это ухудшает и характеристики проводимости диода. Изменение соотношения этих двух параметров (времени жизни носителей и дозы облучения He^{**}) позволяет оптимизировать динамические характеристики в широком пределе. Таким образом удастся добиться необходимой «плавности» восстановления в любых условиях эксплуатации, особенно это важно на малых токах. Использование описанной технологии позволяет обеспечить очень высокую динамическую надежность CAL-диодов 12 и 17 классов, что подтверждается их успешным тестированием при скоростях изменения тока до 15 кА/мкс.

Относительно малая ширина базы w_B у CAL-диодов может быть обеспечена средствами технологии РТ, о чем подробно написано в предыдущих публикациях (СЭ № 5'2012, № 6'2012, № 1'2013). При этом достигается оптимальное соотношение между характеристиками переключения и проводимости. Значение w_B также оказывает заметное влияние на параметры включения диодов: при увеличении ширины базы пропорционально растет напряжение прямого восстановления V_{FR} . У CAL-диодов 17 класса подобная оптимизация позволяет снизить величину V_{FR} более чем на 50% по сравнению с аналогичными компонентами других типов.

Антипараллельные диоды для управляемых тиристоров типа IGBT (Insulated Gate Controlled Thyristor) с высоким обратным напряжением, так же, как и снабберные, могут производиться с применением CAL-

концепции, поскольку динамическая надежность для них является одним из основных требований. Соответствующая оптимизация компонентов, производимых по РТ-технологии, позволяет повысить их стойкость к воздействию космической радиации. В снабберных диодах применение CAL-технологии дает возможность снизить напряжение прямого восстановления V_{FR} и ток утечки.

Эмиттерная концепция

В обычных *p-i-n*-диодах *p-n*-переход насыщен носителями заряда в большей степени, чем *n-n+*-зона. Идея эмиттерной концепции состоит в инверсии распределения носителей заряда: область *n-n+* должна содержать больше носителей, чем *p-n*-переход, что достигается снижением уровня инжекции в *p*-эмиттере.

Одной из практических реализаций данной концепции является «составной PIN/Шоттки диод», состоящий из последовательно соединенных *p+*-слоя и барьера Шоттки (рис. 16). Существует достаточно много подобных решений, в том числе это структуры с диффузионными *p*- и *n*-областями. Преимущества барьера Шоттки и подобных ему, однако, проявляются только до 600 В, при напряжениях выше 1000 В омическое падение напряжения сводит их на нет. Решением в этом случае является уменьшение площади зоны инжекции в *p*-слое, аналогичный эффект достигается при использовании однородной низколегированной *p*-области (рис. 16).

Литература

1. Arendt Wintrich, Ulrich Nicolai, Werner Tursky, Tobias Reimann. Application Notes for IGBT and MOSFET modules. SEMIKRON International. 2010.
2. Martin Freyberg, Uwe Scheuermann. Measuring Thermal Resistance of Power Modules // PCIM Europe journal. 2003.
3. Thermal Considerations in the Application of Silicon Rectifier. IR Designer's Manual. 1991.
4. Calculation of the Maximum Virtual Junction Temperature Reached Under Short-time or Intermittent Duty. IEC 60747-6 by SEMIKRON.

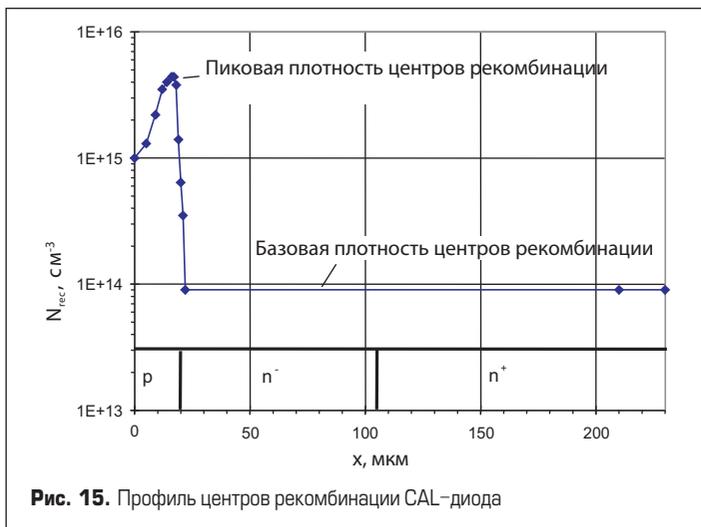


Рис. 15. Профиль центров рекомбинации CAL-диода

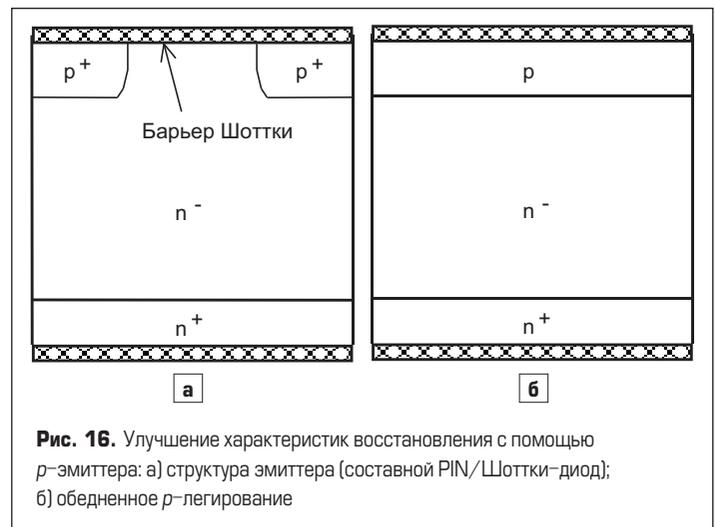


Рис. 16. Улучшение характеристик восстановления с помощью *p*-эмиттера: а) структура эмиттера (составной PIN/Шоттки-диод); б) обденное *p*-легирование